



EESTI MAAÜLIKOOL
Põllumajandus- ja keskkonnainstituut

Annette Tilk

TOIDUJÄÄTMETE BIOGAASI TOOTLIKKUS
BIOGAS POTENTIAL OF FOOD WASTE

Bakalaureusetöö
Keskkonnakaitse õppekava

Juhendaja: Kaja Orupõld, *PhD*

Tartu 2017

LÜHIKOKKUVÕTE

Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Bakalaureusetöö lühikokkuvõte	
Autor: Annette Tilk		Õppekava: Keskkonnakaitse (406)	
Pealkiri: Toidujäätmete biogaasi tootlikkus			
Lehekülgi: 32	Jooniseid: 6	Tabeleid: 8	Lisasid: 0
<p>Osakond: Põllumajandus- ja keskkonnainstituut Uurimisvaldkond: Keskkonnatehnoloogia, reostuskontroll (T270) Juhendaja(d): Kaja Orupõld Kaitsmiskoht ja aasta: Tartu, 2017</p> <p>Toidujäätmed on maailmas aina kasvav probleem, millele on hakatud üha enam tähelepanu pöörama. Toidujäätmete kasutamine biogaasi tootmiseks võib olla üheks võimalikuks lahenduseks vältimatute toidukadude käitlemiseks ja suureneva energiavajaduse rahuldamiseks. Käesoleva töö eesmärk on hinnata tootlustusasetevõtte tekkivate toidujäätmete biogaasi ja metaani tootlikkust. Töös uuriti 7 tootlustusasetevõtte ja ühe toidutööstusasetevõtte toidujäätmeid. Biogaasi ja metaani tootlikkuse määramiseks viidi läbi BMP (biokeemilise metaani potentsiaali) katsed. Analüüsitud toidujäätmetest saadi biogaasi 349-780 L/kg kuivaine ja 362-834 L/kg orgaanilise aine kohta. Metaani tootlikkus jäid vahemikku 243-552 L/kg kuivaine ja 252-592 L/kg orgaanilise aine kohta. Metaani hulk biogaasis oli 59-78%. Saadud tulemused sarnanesid teiste autorite poolt saadud tulemustega. Kuna jäätmete koostis varieerub olulisel määral, varieerus ka metaani tootlikkus. Saadud tulemustest selgus, et toidujäätmed on sobilikuks lähtematerjaliks biogaasi tootmisel.</p>			
Märksõnad: Jäätmekäitlus, taastuvenergia, anaeroobne kääritamine			

ABSTARCT

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Bachelors’s Thesis	
Author: Annette Tilk		Specialty: Environment protection (406)	
Title: Biogas potential of food waste			
Pages: 32	Figures: 6	Tables: 8	Appendixes: 0
Department: Institute of Agricultural and Environmental Sciences Field of research: Environmental technology, pollution control (T270) Supervisor: Kaja Orupõld Place and date: Tartu 2017			
Food waste is becoming a serious problem worldwide and it has gained a lot of attention in recent years. Using food waste as a source material for biogas production can help to reduce environmental pollution and the growing demand for energy. The objective of this thesis is to evaluate biogas and methane potential of food waste from food service. Food waste samples were collected from 7 food service enterprises and one food manufacturer. BMP (biochemical methane potential) tests were carried out in the lab to measure the production of biogas and methane. Biogas yields were 349-780 L/kg TS and 362-834 L/kg VS. Methane yields ranged from 243 to 552 L/kg TS and from 252 to 592 L/kg VS. The percentage of methane in biogas was between 59-78%. Obtained results were in accordance with similar results from other researchers. The results showed that food waste has a highly variable composition and therefore the results were also variable. According to the results food waste can be considered as potential feedstock for biogas production.			
Keywords: Waste management, renewable energy, anaerobic digestion			

SISUKORD

SISSEJUHATUS	5
1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE	7
1.1. Toidujäätmed	7
1.1.1. Toidujäätmete teke ja kogused	9
1.2. Biogaas	11
1.2.1. Anaeroobne kääritamine	12
1.3. Toidujäätmete kasutamine biogaasi tootmiseks	15
2. METOODIKA	17
2.1. Proovide iseloomustus	17
2.2. Biogaasi mõõtmine	18
3. TULEMUSED	20
4. ARUTELU	26
KOKKUVÕTE	28
SUMMARY	29
KASUTATUD KIRJANDUS	30

SISSEJUHATUS

Toidujäätmed on paratamatu osa inimtegevusest. Nende suuremahulise tekkimisega kaasneb suurel hulgal eetilisi, majanduslikke ja keskkonnaalaseid probleeme, mistõttu tuleb toidujäätmete teket vältida ja vähendada. Siiski pole võimalik toidujäätmete teket täielikult vältida ning seetõttu on vajalik leida mõistlikke lahendusi vältimatute toidujäätmete käitlemiseks. Toidujäätmete ladestamise või põletamisega tekib hulk keskkonnaprobleeme ja suur osa neis leiduvatest toitainetest ja energiast läheb kaotsi. Viimastel aastatel on kasvanud huvi taastuenergia tootmise vastu ning toidujäätmed on üheks võimalikuks taastuenergia allikaks.

Huvi taastuenergia vastu on suuresti kasvanud seetõttu, et energiatarbimine on üle terve maailma pidevas tõusus. Eesti taastuenergia tegevuskava prognoosi kohaselt kasvab Eestis aastatel 2010-2020 elektri tarbimine võrreldes 2005-2008 aastate keskmisega 30% (mitte arvestades energiasektorit) ning kütuste tarbimine kasvab võrreldes 2005-2008 keskmisega 18% (ilma energiasektorita) (Eesti taastuenergia tegevuskava aastani 2020). Tänapäeval kasutatakse kütustena enamasti fossiilseid kütuseid, mis on ühed olulisemad kasvuhoonegaaside allikad. Peale keskkonnoahtude kaasnevad hetkel domineerivate energiaallikate kasutamisega ka riiklikud ohud, kuna paljud nende leiukohad asuvad poliitiliselt ebastabiilsetes regioonides (Weiland 2010). 2010. aastal avaldati Eesti Taastuenergia tegevuskava aastani 2020, mis loodi Euroopa Liidu Taastuenergia Direktiivi 2009/28/EÜ elluviimiseks. Selle kohaselt peaks Eesti energiatarbimine tulenema vähemalt 25% ulatuses taastuenergiast (Eesti taastuenergia tegevuskava aastani 2020, 2010). Eesti geoloogiliste ja kliimatiliste tingimuste juures oleks biogaasi tootmine arvestatav panus selle eesmärgi täitmiseks.

Antud töö eesmärgiks on hinnata tootlustusettevõtete toidujäätmete biogaasi tootlikkust. Esimeses peatükis antakse kirjanduse põhjal ülevaade toidujäätmete olemusest ja tekkest, biogaasi olemusest ja selle tootmisest anaeroobsel kääritamisel ning toidujäätmete kasutamisest anaeroobse kääritamise lähtematerjalina. Teises peatükis kirjeldatakse katses kasutatud lähtematerjale ning läbiviidud katsete metoodikat. Kolmandas peatükis

esitatakse saadud katse tulemusi. Neljandaks peatükiks on arutelu, kus võetakse kokku kirjandusest ja katse käigus saadud tulemused ning toidujäätmetest biogaasi tootmise tugevused ja nõrkused.

Autor tänab töö valmimisel suureks abiks ja toeks olnud juhendajat Kaja Orupõldu ja toidujäätmete proovide kogumise eest Karl – Josep Jakobsoni. Samuti tänab autor kõiki ettevõtteid, kes oma toidujäätmeid olid lahkelt nõus katseteks andma.

1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

1.1. Toidujäätmed

Üldiselt defineeritakse toidujäätmeid kui toidu valmistamisest ja tarbimisest ülejäänud jäätmeid, mis on ära visatud. Erinevatel asutustel ja ühendustel, kes tegelevad toidujäätmete regulatsiooniga (näiteks Euroopa Liit, ÜRO ja USA), on toidujäätmete definitsioonid erinevad. Erinevused tulenevad suuresti toidujäätmete edasistest kasutamisvõimalustest ja jäätmekäitluse eesmärkidest. Selle töö raames kasutatakse Euroopa Komisjoni keskkonna peadirektoraadi raporti „Preparatory study on food waste across eu 27“ definitsiooni, kus toidujäätmed on defineeritud kui: „Jäätmed, mis koosnevad tooretest või valmistatud toiduainetest. Nende hulka kuuluvad kõik toiduained, mis on olelusringi jooksul ära visatud. Kodumajapidamiste toidujäätmed on toiduained, mis on mittesöödavuse, riknemise, üle jäämise või muude põhjuste tõttu ära visatud. Toidujäätmed võivad olla nii söödavad kui ka mittesöödavad, (Preparatory Study... 2010).

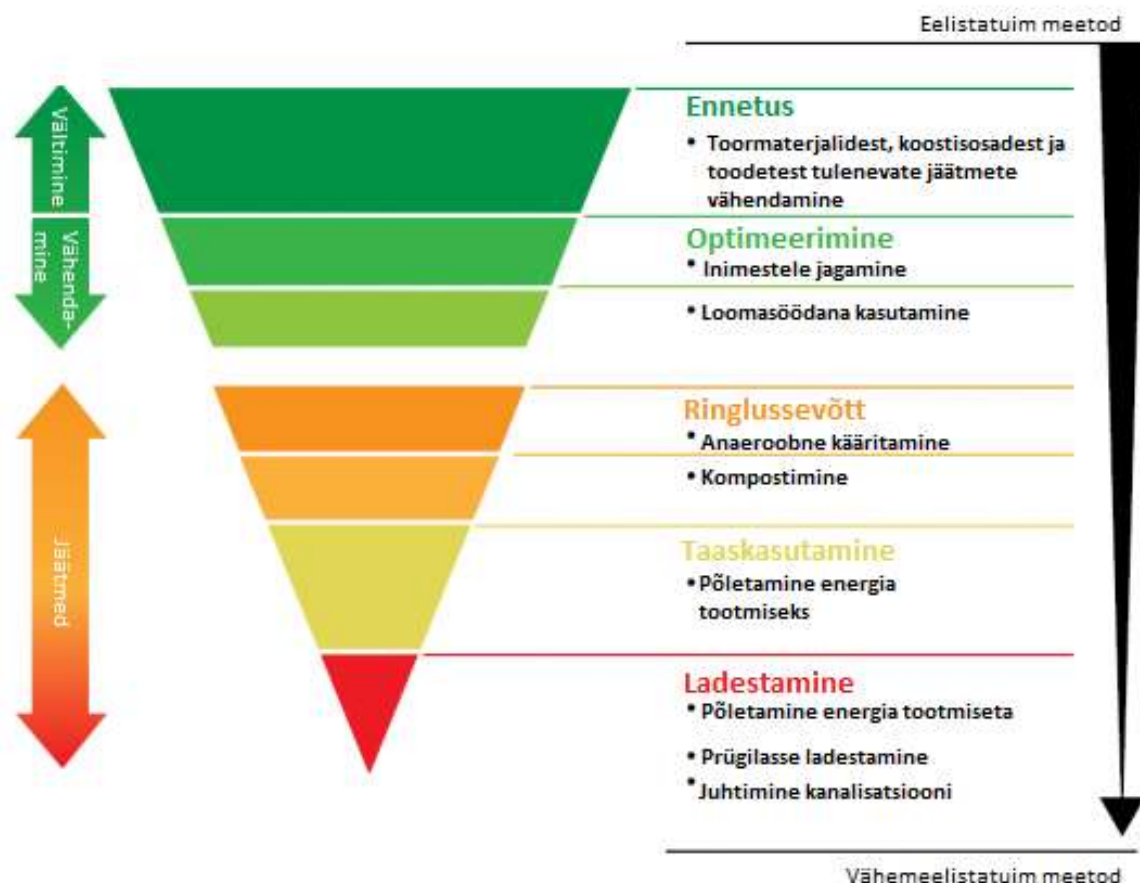
Toidujäätmete hulka kuulub ka toidukadu, mis on defineeritud kui: „Mis tahes algselt inimtarbimiseks mõeldud toit või toiduaine, mis on toidutarneahelast majanduslikel või esteetilistel põhjustel või tarbimistähtaja ületamise tõttu eemaldatud, kuid mis on veel söödav ja inimtoiduks kõlblik.“ (Moora *et al.* 2015b). Toidukadu on väga oluline sotsiaalne, majanduslik ja keskkonnavalne probleem. Samuti tekitab see ka eetilisi küsimusi, kuna ÜRO Toidu- ja Põllumajandusorganisatsiooni (FAO) hinnangul läheb maailmas raisku umbes üks kolmandik toodetud toidust. Samal ajal on arengumaades tõsiseks probleemiks toidu vähesus ja sellega kaasnev elukvaliteedi langus (Bräutigam *et al* 2014, Cicatiello *et al* 2016).

Toidujäätmete hierarhia kohaselt on eelisjärjekorras jäätmetekke vähendamisega seotud tegevused (joonis 1). Samas ei saa toidujäätmeid täielikult elimineerida, kuna need sisaldavad osasid, mida ei saa inimeste toitmiseks või loomasöödana enam kasutada (näiteks munakoored, roiskunud toiduained jne). Seetõttu on otstarbekas toidujäätmete käitlemine anaeroobse kääritamise või kompostimise teel, mis suunavad jäätmetes leiduvad

ained taas ringlusesse. Toidujäätmete käitlemise hierarhia lõpus on põletamine energia saamiseks ja ladestamine ehk tegevused, mida tuleb tingimata takistada (Prevention... 2014). Eestis on biolagunevate jäätmete, sealhulgas ka toidujäätmete, ladestamise kogus prügilatesse reguleeritud jäätmeseaduse paragrahviga 134: „Prügilasse ladestatavate olmejäätmete hulgas ei tohi biolagunevaid jäätmeid olla: (Jäätmeseadus § 134)

- 1) üle 45 massiprotsendi alates 2010. aasta 16. juulist;
- 2) üle 30 massiprotsendi alates 2013. aasta 16. juulist;
- 3) üle 20 massiprotsendi alates 2020. aasta 16. juulist.“

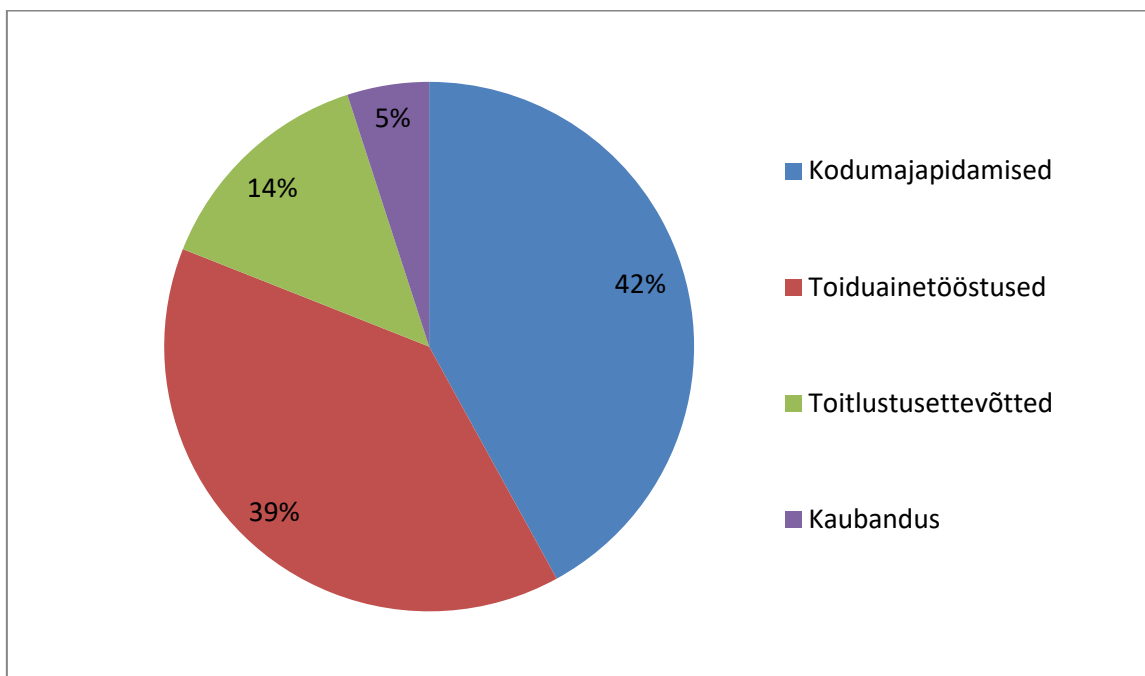
Sellised jäätmeid puudutavad nõuded ei takista toidujäätmete teket, küll aga mõjutavad need oluliselt jäätmete käitlemist pärast selle tekkimist. Euroopa Liidus läbiviidud uuringu põhjal hinnatakse, et aastatel 2006 kuni 2020 võib prügilatesse ladestatav toidujäätmete hulk väheneda 40,5 tonnilt kuni 4,0 tonnini (Preparatory Study... 2010).



Joonis 1. Toitude ja jookide käitlemise hierarhia (Prevention...2014)

1.1.1. Toidujäätmete teke

Euroopa Komisjoni uuringu kohaselt on Euroopa liikmesriikide lõikes Eurostati andmetel suurimateks toidujäätmete allikateks kodumajapidamised (42%) ja toiduainetööstused (39%) (Joonis 2). Märgatavalt väiksemad kogused saadakse toitlustusettevõtetest (14%) ja kaubandusest (5%). Uuringust jäeti välja põllumajandusest tekkinud toidujäätmed (Preparatory Study... 2010). Toidujäätmete kogustele Euroopa Liidus on raske anda täpseid hinnanguid, kuna andmete kvaliteet on liikmesriikide lõikes ebaühtlane ning Eurostati andmed ei kajasta alati reaalseid koguseid (Preparatory Study... 2010, Estimates of... 2016).



Joonis 2. Toidujäätmete tekke allikad Euroopa Liidus (Preparatory study... 2010)

2006. aastal hinnati Euroopa Liidu keskmiseks toidujäätmete koguseks kodumajapidamistes ligikaudu 37,7 Mt ehk umbes 76 kg inimese kohta (Preparatory Study... 2010). 2012. aastal tekkis kodumajapidamistes hinnanguliselt 47 ± 4 Mt toidujäätmeid (Estimates of... 2016). 2014. aastal Stockholmi Keskkonnainstituudi Tallinna keskuse (SEI Tallinn) poolt läbiviidud uuringu põhjal selgus, et keskmiselt tekkis Eestis ühel leibkonnal 2,5 kg toidujäätmeid nädalas ehk 130,41 kg aastas. Ühe leibkonnaliikme kohta tekkis aastas ligikaudu 54 kg toidujäätmeid. 50% uuritavatest leibkondadest kogus toidujäätmeid eraldi: 60% neist leibkondadest viskasid jäätmed

biojäätmete konteinerisse (kõik niimoodi vastanud leibkonnad asusid Tallinnas) ning 40% kompostis jäätmeid ise. Küsimustike vastuseid analüüsid selgus aga, et paljud toidujäätmeid komposteerivad leibkonnad ei tee seda pidevalt või ei komposteerigi kõiki toidujäätmeid (Moora *et al.* 2015a). Kui võtta ühe inimese poolt aastas tekitatud toidujäätmete kogus ja korrutada see Eesti elanike ligikaudse arvuga (1,3 miljonit) saame Eesti elanike poolt ära visatud toidujäätmete koguseks ligi 70 200 t aastas.

Keskmiselt tekkis Euroopa Liidus 2012. aastal toitlustussektoris peaaegu 11 ± 2 Mt toidujäätmeid (Estimates of... 2016). Eesti toitlustusasutuste (toitlustusettevõtted, haridusasutuste sööklad ja tervishoiuasutused) toidujäätmete tekke koguseid oli ettevõtete poolt pakutavate toidu- ja serveerimistüüpide tõttu raske võrrelda, kuid keskmiselt viskasid uuritud toitlustusasutused ära umbes 43 kg toidujäätmeid päevas ehk ligikaudu 15,5 t aastas. Uuringu koostajate hinnangul võiks Eesti toitlustusasutuste keskmine ära visatav toidujäätmete kogus olla ligi 13 040 t aastas (Moora *et al.* 2015a).

Arvestades nii söödavaid kui mittesöödavaid toidujäätmeid, tekkis neid 2012. aastal kaubanduses Euroopa Liidus keskmiselt ligikaudu $4,6 \pm 1$ Mt (Estimates of... 2016). Eesti kaubandusettevõtete toidujäätmete koguse uurimiseks analüüsiti 2015. aastal jäätmearuandluse infosüsteemi (JATS) ning korraldati küsitlus. Sellest selgus, et 2013. aastal käideldi JATS-i andmete põhjal kaubandusettevõtetes ligi 5 290 tonni toidujäätmeid. Kui sellele liita veel toidujäätmete kogus, mis olmeprügi hulka visatakse, võiks uuringu koostajate arvates toidujäätmete kogus olla ligikaudu 6 200 tonni aastas. Koguse muudab madalaks tõsiasi, et paljusid kaubanduses realiseerimata toidukaupu ei käidelda konkreetse kaubandusettevõtte poolt, vaid need saadetakse tagasi tarnijatele. Samuti kogutakse eraldi loomset päritolu jäätmeid, mida käitleb vastav ettevõtte loomsete kõrvalsaadustena. Uuringusse kaasatud kaubandusettevõtetest 38% kogus toidujäätmeid eraldi, peaaegu kõik niimoodi vastanutest olid suured jaekauplused. Kõige suurem takistus toidujäätmete eraldi kogumisel kaubandusettevõtete puhul on toodete pakendid, millega neid käidelda ei saa, kuid mille eemaldamiseks tööjõud ja vahendid puuduvad (Moora *et al.* 2015b).

Eurostati andmetel tekkis 2006. aastal Euroopa Liidu toiduainetööstuses ligikaudu 37 Mt toidujäätmeid (Preparatory study... 2010). 2012. aastal võis tööstuses tekkinud toidujäätmete hulk ulatuda 17 ± 13 megatonnini. Võrreldes kaubandusettevõtetega tekib toiduainetööstuses tekib JATS-i andmetel toidujäätmeid vähem, kuna mitmeid

kõrvalsaadusi saab kasutada näiteks loomasöödana või ümbertöödelda. Samuti ei sorteeritud kõik väiksemad ettevõtted toidujäätmeid olmejäätmetest eraldi. 2013. aastal käideldi Eestis JATS-i andmetel toiduainetööstustes 3392 t toidujäätmeid, millest 79% moodustasid lihatööstusest pärit toidujäätmed (Moora *et al.* 2015b).

Toidujäätmete tekke kogused sõltuvad mitmetest asjaoludest ning erinevates sektorites on mitmeid erinevaid mõjutavaid tegureid. 2006. aastal tekkis Euroopa Liidus kõigi uuritud sektorite lõikes ligikaudu 89 Mt toidujäätmeid, mis teeb elaniku kohta umbes 179 kg. Hinnangute alusel võib toidujäätmete kogus liikmesriikides kasvada aastaks 2020 umbes 40% ehk 126 megatonnini, kui selle vastumeetmeid ei rakendada või kui kehtivad meetmed ei toimi. Põhilised toidujäätmete koguse kasvu soodustavad tegurid on rahvaarvu kasv ja vaba raha olemasolu, mis on mõlemad tõusvas trendis (Preparatory study... 2010). Arengumaades, kus elanike arv ja majanduse kasv on veel kiiremas tempos kasvav, on toidujäätmete hulga suurenemine veelgi kriitilisem lahendust vajav probleem.

Toidujäätmete käitlemiseks on mitmeid erinevaid võimalusi: kasutamine loomasöödana, anaeroobne kääritamine, kompostimine, põletamine või ladestamine. Nende rakendamine võib olla riigiti ja piirkonniti erinev, sõltudes toidujäätmete kogustest, tehnoloogilistest võimalustest, seadusandlusest ja jäätmekäitluse eesmärkidest.

1.2. Biogaas

Biogaas on: „orgaanilise aine käärimisel tekkiv metaanist (umbes 2/3) ja süsinikdioksiidist (umbes 1/3) koosnev gaas, milles leidub vähesel määral ka veeauru, divesiniksulfiidi (H_2S), ammoniaaki (NH_3), süsinikdioksiidi (CO) ja lämmastikku (N_2).“ (Kriipsalu *et al.* 2016). Biogaas tekib looduslikult hapnikuvabades ehk anaeroobsetes keskkondades nagu soodes või mäletsejate magudes. Prügilates kogutav orgaaniliste jäätmete lagunemisel tekkiv prügilagaas on omadustelt sarnane biogaasiga (Kask 2014).

Biogaasi loetakse taastuvaks energiaallikaks. Biogaasi tootmise eeliseks on metaani (CH_4) mitmed kasutusvõimalused fossiilsete kütuste alternatiivina soojuste ja elektri tootmisel ning sõidukite kütusena. Metaanirikast puhastatud biogaasi ehk biometaanit saab kasutada

maagaasi asemel kemikaalide ja materjalide tootmiseks (Weiland 2010). Euroopa Liidus kasutatakse biogaasi suures osas soojuse ja elektri koostootmisjaamades, kuid aina rohkem suunatakse seda ka biometaanu kujul maagaasivõrkudesse (Kask 2014).

1.2.1. Anaeroobne kääritamine

Anaeroobne kääritamine (ka biogaasistamine) (ingl *anaerobic digestion* või lühendatult *AD*) on protsess, mille käigus orgaaniline aine muudetakse bakterite poolt hapnikuvabas keskkonnas biogaasiks (De Clercq *et al* 2016). Metaankääritamine koosneb neljast faasist (Kriipsalu *et al* 2016):

- 1) hüdrolyüs- orgaanilised kompleksühendid (lipiidid, tselluloos, valgud ja ligniin) lagundatakse bakterite poolt rakuväliste ensüümidega monomeerseteks ühenditeks;
- 2) kiire happemoodustumisfaas- esimeses faasis tekkinud ühendid muudetakse atsetogeensete bakterite poolt väikeste molekulmassidega lenduvateks rasvhapeteks, süsinikdioksiidiks ja vesinikuks;
- 3) kiire käärimisfaas- pikema ahelaga orgaanilised happed ja alkoholid muudetakse bakterite poolt äädikhappeks ja vesinikuks;
- 4) aeglaselt kulgev gaasitekkefaas- erinevad obligatoorselt anaeroobsed arhede liigid toodavad metaani vesinikust, süsinikdioksiidist ja äädikhapest. Selles faasis tegutsevad kõige tundlikumad ja aeglasemalt paljunevad bakterid, seetõttu tuleb biogaasi tootmisel arvestada enim selles faasis tegutsevate bakterite vajadustega (Biogaasi tootmine...2009).

Tööstuslikult kasutatakse biogaasi tootmisel mesofiilset (käärimistemperatuur 30-38°C) või termofiilset (50-57°C) käärimist. Biogaasi teke toimub ka psührofiilisel käärimisel (temperatuuriga alla 20°C), kuid see protsess on väga aeglane. Termofiilse käärimise eeliseks on protsesside kiirem toimumine, tahke materjali parem kasutamine ning patogeensete organismide ja umbrohuseemnete tõhusam hävitamine. Samas on sellisel viisil kääritamise energiakulu tunduvalt suurem (eriti külma kliimaga riikides nagu Eesti) ning termofiilsed mikroorganismid on võrreldes mesofiilsetega temperatuuri kõikumise suhtes tundlikumad, mis muudab protsessi ebastabiilsemaks (Kriipsalu *et al* 2016). Termofiilsetel bakteritel läheb uue temperatuuriga kohastumiseks rohkem aega, samas kui mesofiilsed bakterid taluvad kuni ± 3 kraadilist kõikumist, ilma et toodetud metaanikogus

märgatavalt väheneks. Üldiselt tuleks mõlema meetodi puhul hoiduda temperatuuri muutusest või kõikumisest (Weiland 2010).

Anaeroobset käärimist saab läbi viia nii märg- kui ka kuivkäärimistehnoloogiaga. Oluline on märkida, et mõlema variandi puhul on siiski bakterite elutegevuseks vaja vedelat keskkonda. Kuivkääritamine toimub siis, kui algsubstraadi kuivaine sisaldus jääb 20-40% vahele ning käärimiskambris olev mass pole enam pumbatav. Märgkääritamine toimub, kui substraadi kuivaine sisaldus jääb alla 15%. Rohkem kasutatakse märgkäärimistehnoloogiat (Biogaasi tootmine... 2009). Kuivkääritamistehnoloogiat rakendades peab kasutama sobivate segamis- ja laadimisseadmetega reaktorit. Külmas kliimas pole see tehnoloogia soovitatav, kuna jäätmed võivad talvel külmuda ning neid on keeruline käidelda (Kriipsalu *et al* 2016).

Biogaasi lähtematerjalina on vastavalt võimalustele võimalik kasutada erinevaid materjale. Maailmas kasutatakse näiteks olmejäätmete biolagunevat osa (*OFMSW*), tööstusettevõtete biolagunevaid jäätmeid ja jääke, põllumajandus- ja aiandusjäätmeid, taime-, linnu- või loomakasvatusest pärit jääke, reoveesetteid ja –mudasid ning rohtset biomassi (nii looduslikult kasvavat kui ka energiataimi). Samuti on võimalik koguda biogaasi prügilates toimuvatest käärimisprotsessidest (Kask 2014). Tabelisse 1 on toodud enimkasutatavate biogaasi lähtematerjalide metaani tootlikkus ja metaani sisaldus biogaasis.

Tabel 1. Levinud biogaasi lähtematerjalide metaani toodang ja sisaldus biogaasis (Biogaasi tootmine... 2009)

Substraat	CH₄ L/kg TS	CH₄ sisaldus (%)
Veise vedelsõnnik	200-500	60
Sea vedelsõnnik	300-700	60-70
Maisisilo	450-700	50-55
Rukkisilo	550-680	55
Suhkrupeet	800-860	53-54
Rohusilo	550-620	54-55
Rasvaeraldus	700	60-72
Biokonteineri sisu	150-600	58-65

Protsessi stabiilseks läbiviimiseks ja metaanitootmise efektiivsuse tõstmiseks saab kasutada kooskääritamist, mis annab substraatide õige suhte korral kääritatavale massile

lisatoitaineid ning toimib puhverainena. Koos toidujäätmetega saab kääritada veepuhastusjaamade aktiivmuda ja looma- või linnukasvatusest pärit sõnnikut (Li *et al* 2010).

Oluline on, et lähtematerjal biogaasi tootmiseks koosneks põhiliselt süsivesikutest, proteiinidest, rasvadest, tselluloosist ja hemitselluloosist. Rasvad annavad kõige kõrgema metaanitoogi, kuid selle kättesaamine võtab kauem aega. Süsivesikud ja proteiinid lagunevad anaeroobsetes tingimustes kiiremini, kuid tulemuseks on väiksemad metaanikogused (Tabel 2) (Weiland 2010). Protsessi stabiilsuse tagamiseks on oluline on algmaterjalis leiduva süsiniku ja lämmastiku suhe, mis peaks jääma 10-30 vahele. Bakteritele on kääritamisprotsessi läbiviimiseks vajalik C, N, P ja S vahekord 600:15:5:1. Protsesse läbiviivad bakterid vajavad elutegevuseks erinevaid mikroelemente nagu raud, koobalt, nikkel jne. Samas on oluline jälgida kõigi ainete koguseid, sest mitmed ained võivad teatud koguste juures mõjuda inhibiitoritena (Biogaasi tootmine...2009). Kui metaankääritamise tooraines leidub piisaval hulgal sulfaate, hakkab metagonees konkureerima sulfaatredutseerumisega (Kriipsalu *et al* 2016).

Tabel 2. Spetsiifiline biogaasi saagis ja metaanisisaldus. Allikas: Biogaasi tootmine... 2009

Lähtematerjal	Biogaasi saagis (L/kg TS)	CH ₄ sisaldus (%)
Seeduv proteiin	600-700	70-75
Seeduv rasv	1000-1250	68-73
Seeduvad süsivesikud	700-800	50-55

Anaeroobse kääritamise jääki ehk digestaati saab pärast biogaasi eraldamist kasutada orgaanilise väetisena. Läga või muu põllumajandustoorme käärimisjääki võib põllule laotada. Reoveesette käärimisest tekkinud käärimisjäägi kasutamisel tuleb lähtuda määrusest „Reoveesette põllumajanduses, haljastuses ka rekultiveerimisel kasutamise nõuded“ (RT I, 19.12.2015, 8). Biolagunevate jäätmete käärimisjäägi kasutamiseks kehtsetab nõuded vastav jäätmeluba. Üheks digestaadi kasutamise võimaluseks on eraldada kääritusjäägi vedelfraktsioon (väde) ja tahefraktsioon (tahes), mida on võimalik kompostida (Kriipsalu *et al* 2016). Olenemata kääritusjäägi edasisest kasutamisest on oluline tagada selle ohutus. Piisaval temperatuuril ja piisava aja vältel läbi viidud kääritamisprotsess tagab selle, et digestaat ei sisalda taimeseemneid, seeneseemneid,

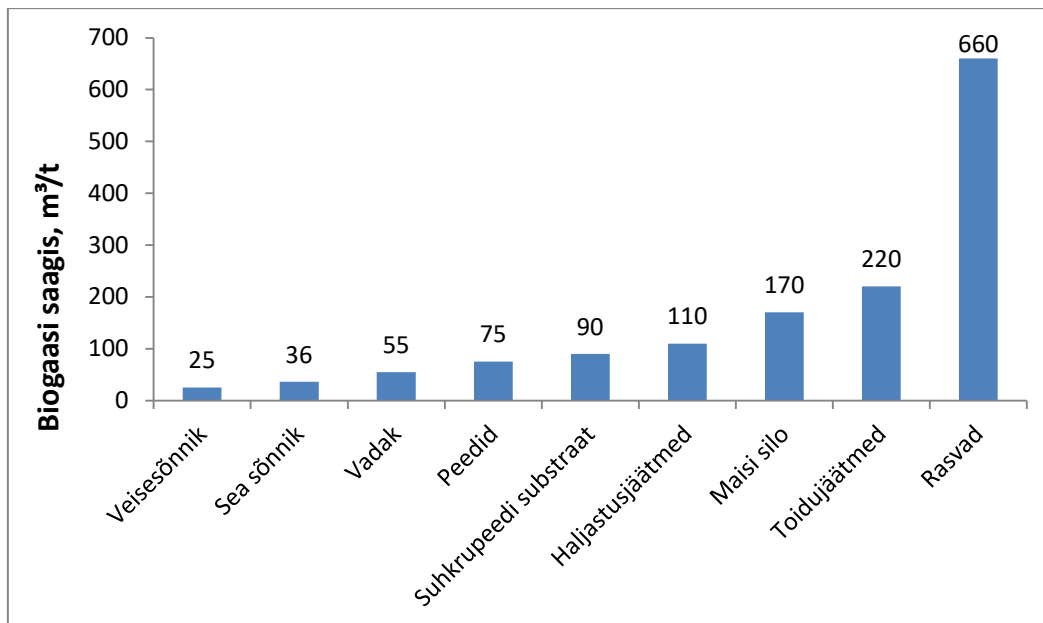
haigusetekitajaid ega parasiitide mune. Eriti oluline on selle kindlustamine loomsete jäätmete käitlemisel, mille vastu saab jääki termiliselt töödelda (70°C juures) või steriliseerida (133°C juures) (Biogaasi tootmine... 2009).

1.3. Toidujäätmete kasutamine biogaasi tootmiseks

Uuringud näitavad, et prügilatesse ladestatavatest olmejäätmetest moodustavad väga suure osa biolagunevad jäätmed. Orgaaniliste jäätmete osakaal olmejäätmetes on eriti kõrge arengumaades, kuid ka arenenud riikides võib selle osakaal ulatuda kolmandikuni (De Clercq *et al* 2016). Pärast ladestamist hakkavad biolagunevad jäätmed lagunema ning võivad eritada vette, pinnasesse või õhku mitmeid kahjulikke aineid. Tekkiva prügilagaasi põhiline koostisosa, metaan, on tunduvalt ohtlikum kliimamuutust põhjustav aine kui süsinikdioksiid (Browne, Murphy 2012). Teiseks probleemiks ladestamisel on prügilate täitumine, mistõttu peavad need liikuma linnaaladest aina kaugemale. Koos aina suurenevate keskkonnamaksude ja transpordihindadega muutub jäätmete ladestamine prügilatesse aina kallimaks (Curry 2012).

Prügilasse ladestamise asemel on toidujäätmeid mõtekam anaeroobselt kääritada või kompostida. Küll aga pole kompostimine energeetilisest vaatenurgast mõttekas, kuna kompostides tekib peamiselt süsinikdioksiid, millel pole energeetilist väärtust (Curry 2012). Toidujäätmete eelised anaeroobse kääritamise algmaterjalina on selle värske massi suhteliselt kõrge metaanisaagikus (Joonis 3). Mitmete toidujäätmete metaaniproduktsoonikatsetega on tulemused jäänud vahemikkusaadud 245-525 mL CH₄/g VS (Raposo *et al* 2012, Curry 2012).

Toidujäätmete koostis muudab selle väga heaks biogaasi lähtematerjaliks. Uuringud on näidanud, et metaankääritamises osalevad bakterid eelistavad õlirikast ja praetud substraati ning selle kasutamisel on saadav biogaasi hulk suurem kui teiste substraatidega (Curry 2012). Ainult taimsed lähtematerjalid koosnevad peamiselt tselluloosist, hemitselluloosist ja ligniinist, mille lagundamine võib olla keeruline ja mille metaanisaagis on tunduvalt madalam võrreldes toidujäätmetes leiduvate piima- ja lihatoodetega (Luna del Risco 2011).



Joonis 3. Biogaasi saagis m³ tonni märgkaalu kohta (Curry 2012)

Anaeroobseks kääritamiseks saab kasutada nii tekkekohas kui ka tööstuslikult sorteeritud toidujäätmeid. Eelnevad uuringud on näidanud, et kuigi mehaanilis-bioloogilise töötlemisega (MBT) eraldatud toidujäätmete süsiniku ja lämmastiku suhe on väga stabiilne, leidub selles suuremal hulgal potentsiaalselt mürgiseid aineid ning selle toitainete sisaldus on väiksem kui tekkekohas eraldatud toidujäätmetel. Samuti pole lubatud MBT jäätmete käärimisjääki kasutada põllumajandusmaade väetamisel (Browne, Murphy 2012). Kuna toidujäätmeid tekib suurtes kogustes kontsentreeritult linnaaladel, võib biogaasi tootmine olla üheks võimaluseks energia tootmiseks lähtematerjali tekkekoha juures (Curry 2012, De Clercq *et al* 2016).

Toidujäätmetest biogaasi tootmise põhiline probleem on selle muutlik ning ebaühtlane koostis ja kogus. Enne biogaasi tootmise alustamist on vaja käideldavaid jäätmeid analüüsida, et määrata protsessi efektiivseks läbiviimiseks vajalikud tingimused (Curry 2012). Kodumajapidamistest pärit toidujäätmete puhul leidub neis sageli sobimatuid osasid (plastik, kondid, metall, klaas jne), mis tuleb seadmete ohutuse ja tootmise efektiivsuse tagamiseks tingimata eemaldada (sarnane probleem esineb kaubandusest pärit pakendatud toidujäätmetega). Samuti peavad toidujäätmed olema pumbatavas konsistentsis, et neid oleks võimalik kergesti kääritisse sisestada (Biogaasi tootmine... 2009). See lisab biogaasi tootmisprotsessi veel ühe lähtematerjali eeltöötlemise etapi ning suurendab seega tootmiskulusid.

2. METOODIKA

2.1. Proovide iseloomustus

Toidujäätmed koguti koostöös Eesti Maaülikooli Metsandus- ja maaehitusinstituudiga. Toidujäätmed saadi seitsmelt erinevalt Tartu toitlustusettevõttelt ja ühelt toidutööstusettevõttelt. Toitlustusettevõtete toidujäätmed olid pärit nii toidu valmistamisest kui ka juba valmistatud toidust. Need sisaldasid nii taimseid kui ka loomseid jääke. Toidutööstusettevõtte jäätmed sisaldasid kalade töötlemise jääke. Saadud toidujäätmed homogeniseeriti purustamise teel, proovide konsistentsi ühtlustamiseks lisati vajadusel vett.

Jäätmeproovide iseloomustamiseks määrati nende kuivaine (TS) ja orgaanilise aine (VS) sisaldus. Kuivaine sisalduse leidmiseks kuivatati proove 105°C juures üleöö. Pärast kuivaine leidmist põletati proove 550°C juures 4 tundi, et põletuskaona määrata orgaanilise aine sisaldus.

Inokulumina biogaasi katsetes kasutati Tartu reoveepuhasti ja põllumajandusjääke töötleva Ilmatsalu biogaasijaama anaeroobseid mudasid. Need sõeluti läbi 2 mm sõela ja hoiti enne kasutamist 3-5 päeva 36°C juures termokapis. Mudade kuivaine ja orgaanilise aine sisaldus määrati sarnaselt toidujäätmetele.

Katsed teostati kahe seeriana. Esimesed proovid koguti 2016. aasta novembris ning teised 2017. aasta jaanuaris (tabel 3). Korduvalt koguti toidujäätmeid neljast toitlustusettevõttest (proovid 1-4), mõlemas katseseerias kasutati lisaks kahe erineva ettevõtte toidujäätmeid (proovid 5-8). Proovide nimedes on esimesena selle allikas ja seejärel katseseeria. Võrdluseks võeti proov ka reoveesetest (R). Mõlemas katseseerias kasutati paralleelselt nii Tartu reoveepuhastist kui ka Ilmatsalu biogaasijaamast saadud inokulume. Inokulumide võrdlemiseks teostati katsed ka tselluloosiga (T).

Tabel 3. Toidujäätmete ja inokulumi proovide nimetused, allikad ja kogumise kuupäevad.

Nimi	Proov	Allikas	Kogumise kuupäev
TBL-1	Anaeroobne muda	Tartu reoveepuhasti	21.11.2016
TBL-2	Anaeroobne muda	Tartu reoveepuhasti	16.01.2017
IBL-1	Anaeroobne muda	Ilmatsalu biogaasijaam	21.11.2016
IBL-2	Anaeroobne muda	Ilmatsalu biogaasijaam	16.01.2017
1-1	Toidujäätmed	Toitlustusettevõte	21.11.2016
1-2	Toidujäätmed	Toitlustusettevõte	16.01.2017
2-1	Toidujäätmed	Toitlustusettevõte	21.11.2016
2-2	Toidujäätmed	Toitlustusettevõte	16.01.2017
3-1	Toidujäätmed	Toitlustusettevõte	21.11.2016
3-2	Toidujäätmed	Toitlustusettevõte	16.01.2017
4-1	Toidujäätmed	Toitlustusettevõte	21.11.2016
4-2	Toidujäätmed	Toitlustusettevõte	16.01.2017
5-1	Toidujäätmed	Toitlustusettevõte	21.11.2016
6-1	Toidujäätmed	Toitlustusettevõte	21.11.2016
7-2	Toidujäätmed	Toitlustusettevõte	16.01.2017
8-2	Toidujäätmed	Toidutööstus	16.01.2017
T	Tselluloos	Kemikaal firmalt Fluka	16.01.2017
R	Reoveesete	Reoveepuhasti	21.11.2016

2.2. Biogaasi mõõtmine

Toidujäätmete biokeemilise metaani potentsiaali (Ingl *biochemical methane potential* ehk BMP) mõõtmiseks kasutati kohandatult Owen *et al* (1979) ja Angelidaki *et al* (2009) juhendeid. Katsed kestsid 35 päeva. Iga prooviga teostati katsed kolmes korduses.

Katsetes kasutatud pudelite kogumaht oli 575 ml. Inokulumi ja substraadi kogused määrati nii, et pudelites oleks kokku 200 ml materjali ning toidujäätmete ja inokulumi orgaanilise aine suhe oleks 0,25. Samuti mõõdeti nn *blank* proove, kus oli ainult 200 ml inokulumi. Peale proovide kokku segamist puhuti pudelid läbi lämmastikuga (N₂) 5 minuti jooksul. Seejärel suleti pudelid hermeetiliselt ning pandi 36°C juures termokappi. Esimesed rõhumõõtmised tehti 2 tundi pärast pudelite sulgemist rõhumõõturiga (BMP-Testsystem WAL, Meß- und Regelsysteme GmbH).

Pudelites olevat substraati segati iga päev käsitsi. Vastavalt käärimisprotsessi intensiivsusele mõõdeti proovides rõhku ja metaani sisaldust algselt kolm korda, seejärel

kaks korda nädalas. Käärimisprotsessi jälgimiseks mõõdeti rõhumõõturiga esmalt pudelis tekkinud rõhk (P_0), tekkinud metaani hulk analüüsiti gaaskromatograafia (CP-4900 Micro-GC, Varian Inc.) ning seejärel mõõdeti rõhku (P_f) uuesti rõhumõõturiga. Mõõtmisperioodi lõpus määrati iga pudeli sisu pH.

Saadud tulemused kanti eelnevalt väljatöötatud Microsoft Exceli „BMP Calculation“ arvutustabelisse. Kumulatiivse biogaasi tootlikkuse arvutamiseks lahutati toodetud biogaasi kogusest *blank* proovide biogaasi kogused. Sarnaselt arvutati ka kumulatiivne metaani tootlikkus. Gaasiteke väljendati liitrites (standardtingimustes 0°C, 1 atm) kilogrammi kuivaine (TS) või orgaanilise aine (VS) kohta. Samuti arvutati metaani protsent biogaasis. Mõnedes proovides täheldati lekkeid ja neid ei võetud lõpptulemuste arvutamisel arvesse.

3. TULEMUSED

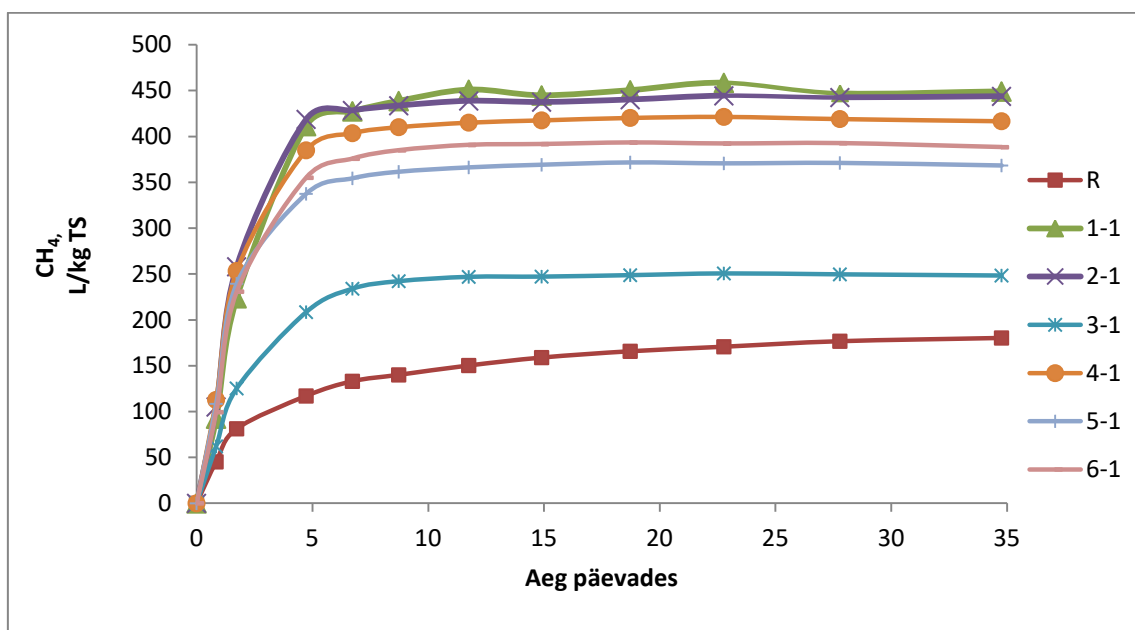
Enne toidujäätmete ja inokulumi kokku segamist määrati lähteainete kuivaine (TS) ja orgaanilise aine (VS) sisaldus. Esimese ja teise katseseeria lähtematerjalide kuivaine ja orgaanilise aine sisaldused on toodud tabelis 4. Tulemustest selgub, et Tartu reoveepuhasti anaeroobse muda kuivaine ja orgaanilise aine sisaldus jäi mõlemas katseseerias stabiilseks. Ilmatsalu biogaasijaama anaeroobse muda kuivaine ja orgaanilise aine tulemused erinesid kahe katseseeria võrdluses veidi enam. Mõlemas katseseerias kasutatud toitlustusettevõtete toidujäätmete tulemused erinesid kõigi proovide lõikes. Katsetes kasutatud toidujäätmete keskmine kuivaine sisaldus oli $16,35 \pm 6,81$ % ja orgaaniline aine moodustas kuivainest keskmiselt $93,34 \pm 2,02$ %.

Tabel 4. Proovide lähtematerjalide keskmine kuivaine ja orgaanilise aine sisaldus

Nimi	Kuivaine \pm standardhälve, %	Orgaaniline aine \pm standardhälve, %
TBL-1	3.09 ± 0.00	58.31 ± 0.10
TBL-2	3.01 ± 0.00	58.26 ± 0.10
IBL-1	4.97 ± 0.01	68.73 ± 0.12
IBL-2	5.80 ± 0.03	70.57 ± 0.03
1-1	7.17 ± 0.25	94.61 ± 0.31
1-2	11.22 ± 0.09	93.93 ± 0.01
2-1	15.49 ± 0.37	93.59 ± 0.25
2-2	23.92 ± 0.48	93.50 ± 0.27
3-1	18.76 ± 0.93	96.29 ± 0.12
3-2	9.62 ± 0.11	91.44 ± 0.14
4-1	24.31 ± 0.17	95.07 ± 1.88
4-2	17.87 ± 0.04	91.14 ± 0.64
5-1	15.29 ± 0.44	92.98 ± 1.19
6-1	10.25 ± 0.25	93.24 ± 0.52
7-2	12.76 ± 0.18	95.24 ± 0.19
8-2	29.52 ± 0.48	88.97 ± 1.69
T	96.73 ± 0.02	99.93 ± 0.01
R	1.73 ± 0.02	69.75 ± 0.09

Joonisel 4 on toodud toidujäätmetest ja reovesetest metaani teke katseperioodi käigus. Graafikult on näha, et toidujäätmete proovide metaaniteke on kõrgem kui reoveesetel.

Samuti on näha, et toidujäätmete proovidest on metaani teke kiirem, saavutades maksimumile lähedase taseme umbes 7 päevaga.



Joonis 4. Uuritud proovidest metaani tekkimine ajas. Tartu anaeroobse mudaga katsetes esimesel katseperioodil

Tselluloosi kasutati võrdlusainena mudade omaduste analüüsimiseks. Kõrgemad biogaasi ja metaani saagised saadi Ilmatsalu anaeroobse mudaga. Tselluloosi biogaasi tootlikkus kuivaine kohta jäi vahemikku 560-702 L/kg (Tabel 5). Metaani tootlikkus kuivaine kohta oli vahemikus 329-427 L/kg. Katsed Tartu mudaga andsid stabiilsemaid tulemusi, Ilmatsalu mudaga katsetes erinesid 2 katseseeria tulemused tselluloosist biogaasi tekkimise kohta rohkem. Metaani protsent biogaasis jäi 51-62% vahele.

Tabel 5. Biogaasi ja metaani tootlikkus tselluloosist ja metaani hulk biogaasis (keskmine \pm standardhälve) Tartu ja Ilmatsalu anaeroobsete mudade võrdluses

Mõõdetud näitaja	Tartu anaeroobne muda		Ilmatsalu anaeroobne muda	
	1	2	1	2
Biogaas, L/kg TS	560 \pm 7	579 \pm 71	702 \pm 33	666 \pm 130
CH ₄ , L/kg TS	329 \pm 5	333 \pm 25	397 \pm 8	427 \pm 32
CH ₄ , %	59 \pm 1	58 \pm 4	51 \pm 1	62 \pm 7

TS - kuivaine, VS - orgaaniline aine

Tabelis 6 on esitatud toidujäätmetest tekkinud biogaasi ja metaani kogused Tartu reoveepuhasti anaeroobse mudaga katsetes. Toidujäätmete biogaasi tootlikkus kuivaine kohta jäi vahemikku 346-797 L/kg (keskmine 613 ± 116 L/kg) ja orgaanilise aine kohta 361-852 L/kg (keskmine 658 ± 93 L/kg). Toidujäätmete metaani tootlikkus kuivaine kohta jäid vahemikku 251-558 L/kg (keskmine 411 ± 83 L/kg) ja orgaanilise aine kohta 260-597 L/kg (keskmine 441 ± 93 L/kg). Metaani keskmine sisaldus biogaasis oli $67 \pm 6\%$.

Tabel 6. Toidujäätmete biogaasi ja metaani tootlikkus ning metaani sisaldus biogaasis Tartu anaeroobse mudaga läbiviidud katsetes (keskmine \pm standardhälve)

Proov	Biogaas, L/kg TS	Biogaas, L/kg VS	CH ₄ , L/kg TS	CH ₄ , L/kg VS	CH ₄ , % biogaasis
1-1	700 \pm 25	740 \pm 27	458 \pm 17	485 \pm 18	64 \pm 0
2-1	700 \pm 23	748 \pm 24	444 \pm 9	475 \pm 10	63 \pm 1
3-1	347 \pm 31	361 \pm 32	251 \pm 21	260 \pm 22	72 \pm 0
4-1	559 \pm 34	602 \pm 36	372 \pm 10	400 \pm 11	66 \pm 5
5-1	683 \pm 47	718 \pm 49	421 \pm 27	443 \pm 28	61 \pm 0
6-1	590 \pm 30	633 \pm 32	393 \pm 23	422 \pm 24	66 \pm 0
1-2	644 \pm 13	685 \pm 14	379 \pm 7	403 \pm 8	59 \pm 0
2-2	797 \pm 34	852 \pm 37	558 \pm 9	597 \pm 9	70 \pm 2
3-2	520 \pm 24	568 \pm 26	320 \pm 8	350 \pm 9	62 \pm 1
4-2	689 \pm 62	755 \pm 68	496 \pm 20	544 \pm 22	72 \pm 4
7-2	545 \pm 86	572 \pm 90	360 \pm 7	378 \pm 7	67 \pm 10
8-2	583 \pm 95	656 \pm 106	473 \pm 35	531 \pm 40	82 \pm 7
R	266 \pm 13	381 \pm 19	180 \pm 2	259 \pm 3	68 \pm 3

TS - kuivaine, VS - orgaaniline aine

Tabelis 7 on toodud tulemused toidujäätmete biogaasi ja metaani tootlikkuse kohta Ilmatsalu biogaasijaama anaeroobse mudaga katsetes. Biogaasi tootlikkus kuivaine kohta jäi vahemikku 351-763 L/kg (keskmine 639 ± 113 L/kg) ja orgaanilise aine kohta 364-839 L/kg (keskmine 686 ± 127 L/kg). Metaani tootlikkus kuivaine kohta jäid vahemikku 235-560 L/kg (keskmine 420 ± 91 L/kg) ja orgaanilise aine kohta 244-630 L/kg (keskmine 451 ± 104 L/kg). Metaani keskmine sisaldus biogaasis oli $64 \pm 6\%$.

Kahe anaeroobse mudaga tehtud katsete keskmiste tulemuste võrdluses selgub, et tulemused olid üldjoontes sarnased (Joonis 5). Proovide keskmine biogaasi ja metaani tootlikkus Ilmatsalu anaeroobse mudaga katsetes oli vähesel määral kõrgem kui Tartu anaeroobse mudaga katsetes, kuid Tartu anaeroobse mudaga katsetes saadi veidi kõrgemad

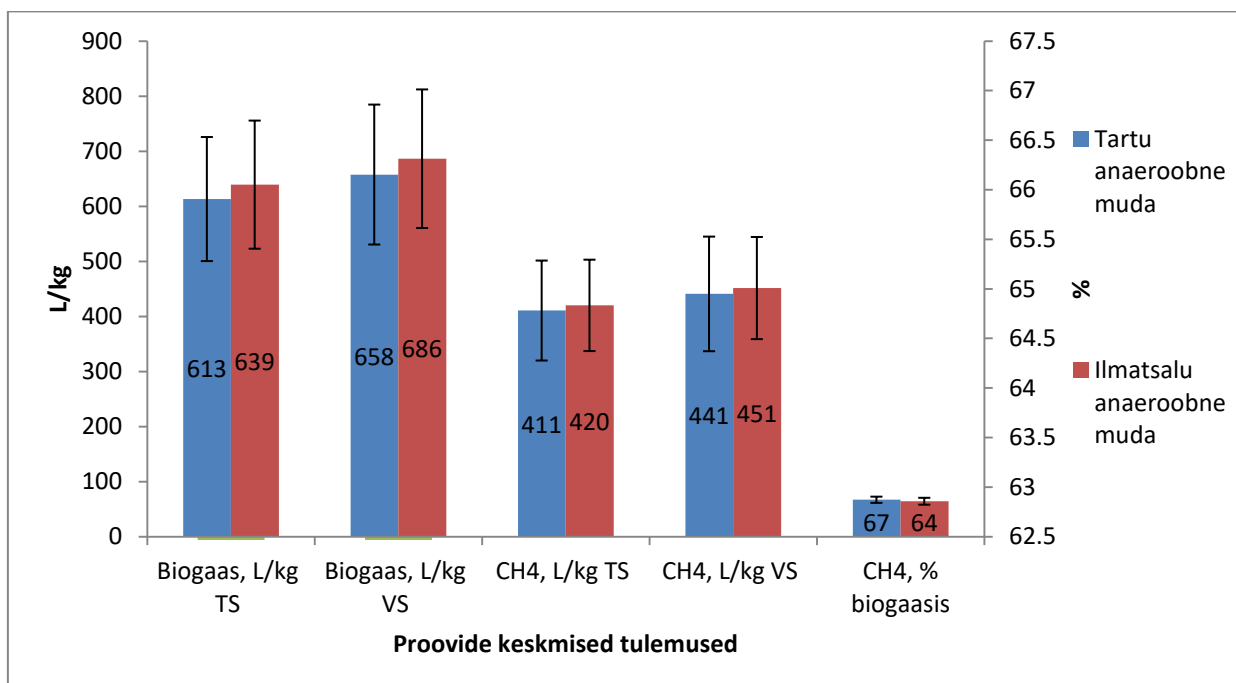
metaani sisaldused biogaasis. Tulemuste vahel siiski statistiliselt olulist erinevust ei ilmnenud.

Tabel 7. Toidujäätmete biogaasi ja metaani tootlikkus ning metaani sisaldus biogaasis Ilmatsalu anaeroobse mudaga läbiviidud katsetes (keskmine \pm standardhälve).

Proov	Biogaas, L/kg TS	Biogaas, L/kg VS	CH ₄ , L/kg TS	CH ₄ , L/kg VS	CH ₄ %
1-1	692 \pm 12	732 \pm 12	417 \pm 5	441 \pm 5	60 \pm 0
2-1*	633	676	410	438	61
3-1*	351	364	235	244	67
4-1	625 \pm 16	672 \pm 17	368 \pm 9	396 \pm 9	57 \pm 0
5-1*	700	736	403	423	58
6-1*	688	738	485	520	61
1-2	644 \pm 18	686 \pm 19	389 \pm 8	414 \pm 9	60 \pm 1
2-2	763 \pm 22	816 \pm 24	546 \pm 28	584 \pm 30	72 \pm 2
3-2	539 \pm 15	590 \pm 17	350 \pm 20	383 \pm 22	65 \pm 2
4-2	716 \pm 47	785 \pm 51	498 \pm 23	546 \pm 25	69 \pm 2
7-2	573 \pm 92	602 \pm 97	379 \pm 28	398 \pm 29	67 \pm 7
8-2	746 \pm 47	839 \pm 53	560 \pm 30	630 \pm 33	75 \pm 1

*-lekete tõttu ei olnud paralleelkatsete tulemusi võimalik arvesse võtta

TS - kuivaine, VS - orgaaniline aine



Joonis 6. Toidujäätmete biogaasi ja metaani tootlikkus Tartu ja Ilmatsalu anaeroobsete mudadega läbiviidud katsete võrdluses. Jooned graafikul tähistavad standardhälbeid

Mõlema anaeroobse mudaga katseid arvesse võttes jäi toidujäätmete biogaasi tootlikkus kuivaine kohta vahemikku 349-780 L/kg (Tabel 8). Keskmine biogaasi tootlikkus kuivaine kohta oli 626 ± 110 L/kg. Proovide biogaasi kogus orgaanilise aine kohta oli 362-834 L/kg. Keskmiseks biogaasi koguseks orgaanilise aine kohta saadi 672 ± 122 L/kg. Keskmiseks metaani tootlikkuseks kuivaine kohta saadi 243-552 L/kg, orgaanilise aine kohta saadi tulemused vahemikus 252-592 L/kg. Keskmised metaani tootlikkuse tulemused kuivaine ja orgaanilise aine kohta olid vastavalt 415 ± 84 L/kg ja 446 ± 96 L/kg. Metaani sisaldus biogaasis jäi vahemikku 59-78%, keskmine tulemus oli $66 \pm 6\%$.

Võrreldes reoveesetega saavutati toidujäätmetega umbes 40-50% suuremad tulemused. Ainult metaani kogus biogaasist oli reoveesette puhul toidujäätmete proovidest kõrgem.

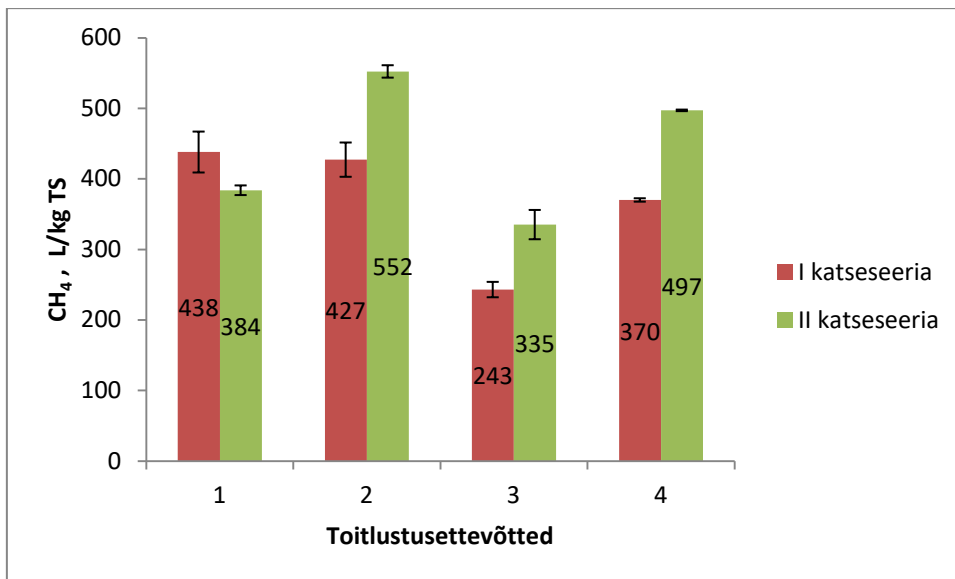
Tabel 8. Toidujäätmete proovide keskmised biogaasi ja metaani tootlikkused ning metaani sisaldus biogaasis

Proov	Biogaas, L/kg TS	Biogaas, L/kg VS	CH ₄ , L/kg TS	CH ₄ , L/kg VS	CH ₄ , % biogaasis
1-1	696 \pm 5	736 \pm 6	438 \pm 29	463 \pm 31	62 \pm 3
1-2	644 \pm 0	685 \pm 0	384 \pm 7	409 \pm 7	60 \pm 1
2-1	666 \pm 48	712 \pm 51	427 \pm 24	456 \pm 26	62 \pm 2
2-2	780 \pm 24	834 \pm 26	552 \pm 9	591 \pm 9	71 \pm 1
3-1	349 \pm 2	362 \pm 2	243 \pm 11	252 \pm 11	69 \pm 3
3-2	529 \pm 14	579 \pm 15	335 \pm 21	366 \pm 23	63 \pm 2
4-1	592 \pm 46	637 \pm 50	370 \pm 2	398 \pm 3	62 \pm 6
4-2	702 \pm 19	770 \pm 21	497 \pm 1	545 \pm 1	71 \pm 2
5-1	691 \pm 12	727 \pm 13	412 \pm 13	433 \pm 14	59 \pm 3
6-1	639 \pm 69	686 \pm 74	439 \pm 65	471 \pm 70	63 \pm 4
7-2	559 \pm 20	587 \pm 21	369 \pm 13	388 \pm 14	67 \pm 0
8-2	665 \pm 115	747 \pm 129	512 \pm 62	580 \pm 69	78 \pm 5
R*	266 \pm 13	381 \pm 19	180 \pm 2	259 \pm 3	68 \pm 3

* reoveesetega katsed teostatud vaid Tartu mudaga

TS - kuivaine, VS - orgaaniline aine

Joonisel 6 on näidatud samast toitlustusettevõttest erinevatel aegadel võetud jäätmeproovide metaani tootlikkused. Tulemustest selgub, et ka samast ettevõttest saadud toidujäätmete omadused ning biogaasi ja metaani tootlikkus on väga varieeruvad. Suurim erinevus oli 4. ettevõtte toidujäätmete metaani tootlikkuse vahel, milleks oli 127 L/kg kuivaine kohta.



Joonis 6. Toitlustusettevõtete toidujäätmete keskmised metaani tootlikkused kuivaine kohta kahel erineval ajal võetud proovide võrdlusena. Jooned tulpade juures tähistavad standardhälbeid

Katseperioodi lõpus mõõdeti proovipudelites pH väärtused. Anaeroobsete mudade pH väärtus jäi vahemikku 7,55-7,92 (keskmise tulemus 7,73 ±0,19). Tselluloosiga proovide keskmine pH oli 7,83 ±0,24, toidujäätmetega proovide keskmine pH 7,61 ±0,23 ja reoveesetega proovides 7,39 ±0,12.

4. ARUTELU

Toidujäätmete teke on ülemaailmselt tõusmas. Hetkel jäävad Eesti toidujäätmete kogused alla Euroopa Liidu keskmise (kirjeldatud lähemalt peatükis 1.1.1.). Juhul, kui Eesti elanike elatustaseme tõus jätkub, jätkub ka toidujäätmete koguste suurenemine. Euroopa Liidu poolt etteantud regulatsioonid nõuavad, et toidujäätmeid peab olmejäätmetest eraldama ning neid korrektselt käitlema. Biogaasi tootmine anaeroobse kääritamise teel on selleks hea võimalus, kuna selle meetodiga saab kasutada toidujäätmetes leiduvat energiat ja kääritamisjääki väetisena kasutades viiakse toitained mulda tagasi.

Analüüsitud toidujäätmete metaani tootlikkused orgaanilise aine kohta olid vahemikus 252-592 L/kg, mis on sarnane teiste poolt läbiviidud katsete tulemustega 245-525 L/kg (Raposo *et al* 2011). Katsetes saadud toidujäätmete metaani tootlikkused kuivaine kohta olid 243-552 L/kg, mis on võrdväärne teiste laialt kasutuses olevate biogaasi lähtematerjalide metaani tootlikkustega, mida on pikemalt kirjeldatud peatükis 1.2.1. Sageli biogaasi tootmise lähtematerjalina kasutatava reoveesette proovi metaani tootlikkus antud töös oli toidujäätmetest tunduvalt madalam. Võrreldes reoveesetega toimus käärimisprotsess toidujäätmetega katsetes kiiremini ning saavutas maksimumile lähedase metaani tootlikkuse ligikaudu 7 päevaga.

Töös kasutati ka ühest kalatooteid töötlevast toidutööstusettevõttest pärit toidujäätmeid. Võrreldes toitlustusettevõtetest saadud proovidega oli nende biogaasi ja metaani tootlikkus keskmisest kõrgem. See on vastavuses peatükis 1.2.1. kirjeldatud biogaasi lähtematerjalide koostisosade metaani tootlikkusega, kus on näha, et valkude, rasvade ja süsivesikute biogaasi saagis ja metaani protsent biogaasis erinevad. Toidujäätmete biogaasi tootlikkus sõltub sellest, kui palju eelpoolnimetatud komponente üks või teine proov sisaldab. Kuna katses kasutati vaid ühte toidutööstusettevõtte proovi, ei saa suuremamahulisi järeldusi toidutööstuse ja toitlustusettevõtete toidujäätmete võrdluses teha.

Tulemused kinnitasid kirjanduse andmeid, et toidujäätmed on äärmiselt varieeruvate omadustega. Nelja toitlustusettevõtte puhul koguti toidujäätmeid kahel erineval korral ning

tulemuste põhjal võib öelda, et toidujäätmete koostis erineb märgatavalt päevast-päeva ning seetõttu on ka saadud biogaasi ja metaani tootlikkused erinevad. Tööstuslikes biogaasi tootmise tingimustes võib see olla probleemiks, kuna töödeldava lähtematerjali omadusi on vaja teada, et leida optimaalsed kogused protsessi efektiivseks toimimiseks.

Katsetes kasutatud juuretise (anaeroobsete mudade) iseloomustamiseks tehtud katsete tulemused tselluloosi metaani tootlikkuse kohta sarnanesid teiste autorite poolt avaldatud tulemustega. Käesolevas töös saadi tselluloosi metaani tootlikkuseks orgaanilise aine kohta 329-427 L/kg. Kirjanduse andmetel on tselluloosi metaanikoguseks orgaanilise aine kohta saadud tulemusi vahemikus 345-419 L/kg (Raposo *et al* 2011).

Toidujäätmete proovide analüüsimisel ei täheldatud inhibiitorite mõju ning katse lõpus mõõdetud pH väärtused näitasid, et pH oli sobiv anaeroobse käärimise toimumiseks.

Toidujäätmed biogaasi lähtematerjalina omavad mitmeid eeliseid teiste lähtematerjalide ees: need on energiarikkad ning nende teke ei olene aastaajast. Samuti on toidujäätmed üks vähestest energiaallikatest, mida saab koguda linnakeskkonnast. Toidujäätmete puudusteks võib lugeda nende äärmiselt varieeruvat koostist ning võimalikke hügieeniriske. Olenevalt allikast võib toidujäätmete hulgas olla ka teisi jäätmeliike, mistõttu nõuab selle eeltöötlemine lisaetappe. Kogudes toidujäätmeid toidutööstusest ja toitlustusettevõtetest, saab vähendada varieeruva koostise ja puhtuse probleeme. Samuti on paljude toidutööstusettevõtete toidujäätmete biogaasi tootlikkus tunduvalt kõrgem kui kodumajapidamistest saadud toidujäätmete puhul, kuna need võivad sisaldada suures koguses loomseid jääke, rasvu jms.

KOKKUVÕTE

Toidujäätmed on maailmas üha enam kasvav probleem, millele hakatakse aina enam tähelepanu pöörama. Euroopa Liidu seadusandluses on hakatud sorteerimata jäätmete ladestamist piirama ning liikmesriigid on kohustatud rakendama uusi jäätmekäitlusvõtteid. Kasvava energiavajaduse ning hetkel kasutuses olevate energiaallikate keskkonnakahjulikkuse tõttu on vaja üha enam kasutusele võtta taastuvaid energiaallikaid. Üheks võimalikuks taastuenergiaallikaks on biogaas, mida saab kasutada nii energia tootmiseks kui ka kütusena ning see on alternatiiviks maagaasile. Toidujäätmete kasutamine biogaasi lähtematerjalina võib olla üheks võimalikuks lahenduseks suureneva energiavajaduse rahuldamiseks ja toidujäätmete väärindamiseks

Toidujäätmete biogaasi tootlikkuse uurimiseks viidi läbi BMP (ingl *biochemical methane potential*) katsed, kus kasutati seitsme toitlustusettevõtte ja ühe toidutööstusettevõtte toidujäätmeid. Tulemuste võrdlemiseks kaasati katsetesse veel tselluloos ja reoveesette proov. Juuretisena kasutati kahest erinevast biogaasijaamast pärinevaid anaeroobseid mudasid. Katsete jooksul mõõdeti proovipudelites rõhku ja metaanisisaldust, mille alusel arvutati välja saadud biogaasi ja metaani tootlikkused.

Toidujäätmete biogaasi tootlikkus jäi vahemikku 349-780 L/kg kuivaine kohta ja 362-834 L/kg orgaanilise aine kohta. Metaani tootlikkused jäid vahemikku 243-552 L/kg kuivaine kohta ja 252-592 L/kg orgaanilise aine kohta. Metaani oli biogaasis 59-78%. Saadud tulemused sarnanesid teiste autorite poolt läbiviidud katsetes saadud tulemustega. Tulemused näitasid, et toidujäätmete koostised olid väga varieeruvad ning seetõttu saadi ka erinevaid tulemusi. Saadud tulemustest selgus, et toidujäätmed on sobilikuks lähtematerjaliks biogaasi tootmisel. Tööstuslikus biogaasi tootmises võib hetkel sobilikumaks osutuda toidutööstusest või toitlustusettevõtetest pärit toidujäätmete kasutamine võrreldes kodumajapidamistest pärit toidujäätmetega.

SUMMARY

Title: Biogas protential of food waste

Food waste is an increasing problem worldwide and it has gained a lot of attention in recent years. Due to European Union's legislation the disposal of unsorted waste is being limited and member states are obliged to implement new waste management techniques. The demand for energy is increasing and currently used energy sources are damaging for the environment, therefore renewable energy is being used more and more. One possible source for renewable energy is biogas which can be used for energy production, as fuel and as an alternative to natural gas. Using food waste as a substrate for biogas can be a solution for meeting increasing energy requirements and using food waste as a resource.

To measure the biogas potential BMP (biochemical methane potential) tests were carried out. Food waste samples were collected from seven food service enterprises and one food manufacturer. To compare test results biogas potential of cellulose and sewage sludge were also measured. Two anaerobic sludge samples were collected from different biogas plants for inoculum. During the test pressure and methane content in the bottles were measured and on the basis of those biogas and methane yields were calculated per kg of total solids or volatile solids.

Biogas yields ranged from 349 to 780 L/kg total solids and 362-834 L/kg for volatile solids. Methane yields were 243-552 L/kg total solids and 252-592 L/kg volatile solids added. The amount of methane in biogas was between 59-78%. Obtained results were in accordance with other results of similar tests. The results showed that food waste has a variable composition and therefore the results also vary. According to these results food waste is a suitable source material for biogas production. For industrial biogas production food waste from food manufacturing or food services could prove to be more suitable than food waste from households at the present time.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. **Angelidaki I., Alves M., Bolzonella D., Borzacconi L., Campos J. L., Guwy A. J., Kalyuzhnyi S., Jenicek P., van Lier J. B.** (2009). Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays - *Water Science & Technology*. Vol 59, No 5, pp. 927-934.
2. Biogaasi tootmine ja kasutamine: Käsiraamat. (2009). Tartu: Eesti Põllumeeste Keskliit.
https://energiatalgud.ee/img_auth.php/7/7b/Eesti_P%C3%B5llumeeste_Keskliit._Biogaasi_tootmine_ja_kasutamine._K%C3%A4siraamat.pdf (10.04.2017)
3. **Browne J.D., Murphy J.D.** (2012). Assessment of the resource associated with biomethane from food waste - *Applied Energy*. Vol 104, pp. 170-177.
4. **Bräutigam K-R., Jörisen J., Priefer C.** (2014). The extent of food waste generation across EU-27: Different calculation methods and the reliability of their results - *Waste Management & Research*. Vol 32, No 8, pp. 683–694.
5. **Cicatiello C., Franco S., Pancino B., Blasi E.** (2016). The value of food waste: An exploratory study on retailing - *Journal of Retailing and Consumer Services*. Vol 30, pp. 96–104.
6. **Curry N.** (2012). Biogas prediction and design of a food waste to energy system for the urban environment - *Renewable Energy*. Vol 41, pp. 200–209.
7. **De Clercq D., Wen Z., Fan F., Caicedo L.** (2015). Biomethane production potential from restaurant food waste in megacities and project level-bottlenecks: A case study in Beijing - *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol 59, pp. 1676–1685.
8. Eesti taastuvenergia tegevuskava aastani 2020. (2010). Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium.
https://www.mkm.ee/sites/default/files/taastuvenergia_tegevuskava.pdf (17.04.2017)
9. Estimates of European food waste levels. (2016). FUSIONS. <https://www.fusions.org/phocadownload/Publications/Estimates%20of%20European%20food%20waste%20levels.pdf> (04.05.2017)
10. **Moora, E. Urbel-Piirsalu, K. Õunapuu.** (2015a). Toidujäätmete ja toidukao teke Eesti kodumajapidamistes ja toitlustusasutustes. Tallinn: Stockholm Environment Institute, Project Report.
11. **Moora, E. Urbel-Piirsalu, T. Viilvere.** (2015b). Toidujäätmete teke Eesti kaubandus- ja toiduainetööstusettevõtetes. Tallinn: Stockholmi Environment

Institute, Project Report.

12. Jäätmeseadus. (2004). (vastu võetud 28.01.2004, muudetud, täiendatud, viimati jõustunud 01.01.2017). – Riigi Teataja. <https://www.riigiteataja.ee/akt/125112016006> (13.04.2017)
13. **Kask Ü.** (2014). Biogaas rohtsest biomassist ja biometaani ressurss - *Eesti Arengufondi vaheraport „Eesti biometaani programm – majanduse kasvumootor“*. Eesti Arengufond. pp. 9-11. https://energiatalgud.ee/img_auth.php/8/8d/Eesti_Arengufond._Eesti_biometaani_programm_-_maakasutus._Vaheraport.pdf (12.04.2017)
14. **Kriipsalu, M., Maastik, A., Truu J.** (2016). Jäätmekäitlus ja pinnase tervendamine. TTÜ kirjastus: Tallinn. 376 lk.
15. **Li R., Chen S., Li X.** (2010). Biogas Production from Anaerobic Co-digestion of Food Waste with Dairy Manure in a Two-Phase Digestion System - *Applied Biochemistry and Biotechnology*. Vol 160, No 2, pp. 643–654.
16. **Luna Del Risco M.** (2011). Biochemical methane potential of Estonian substrates and evaluation of some inhibitors of anaerobic digestion. (Doktoritöö). Eesti Maaülikooli Põllumajandus- ja keskkonnainstituut. Tartu.
17. **Owen W. F., Stuckey D. C., Healy J. B., Young L. Y., McCarty P. L.** (1979). Bioassay for monitoring biochemical methane potential and anaerobic toxicity - *Water Research*. Vol 13, pp. 485 -492.
18. Preparatory study on food waste across eu 27: technical report. (2010). European commission. http://ec.europa.eu/environment/eussd/pdf/bio_foodwaste_report.pdf (04.05.2017)
19. **Raposo F., De la Rubia M.A., Fernández-Cegri V., Borja R.** (2012). Anaerobic digestion of solid organic substrates in batch mode: An overview relating to methane yields and experimental procedures - *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol 16, No 1, pp. 861–877.
20. **Weiland P.** (2010). Biogas production: current state and perspectives - *Applied Microbiology and Biotechnology*. Vol 85, No 4, pp. 849–860.
21. Prevention and reduction of food and drink waste in businesses and households: Guidance for governments, local authorities, businesses and other organisations, Version 1.0. (2014). UNEP. http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/save-food/PDF/Guidance-content.pdf (11.05.2017)

**Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks
ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Mina, Annette Tilk,
(sünnipäev 12/03/1994)

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö
Toidujäätmete biogaasi tootlikkus,
mille juhendaja on Kaja Orupõld,

- 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
- 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
- 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega
isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor

allkiri

Tartu, 22.05.2017

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)